Wpływ parametrów przegrody z barierą termiczną na sprawność bariery

Influence of partition parameters with a thermal barrier on the efficiency of the barrier

WŁADYSŁAW SZAFLIK

DOI 10.36119/15.2023.7-8.3

Obecnie, ze względu na wyczerpywanie zasobów paliw kopalnych i niekorzystnego wpływu ich spalania na środowisko coraz częściej mówi się o ograniczeniu zużycia energii pierwotnej. Duże ilości energii przeznaczane są do ogrzewania budynków. W przypadku dysponowania znacznie tańszą energią odpadową lub pochodzącą ze źródeł odnawialnych o temperaturze niższej niż wymagana w pomieszczeniach, można w celu ograniczenia strat ciepła przez przenikanie wykorzystać tzw. „barierę termiczną" lokalizowaną w ścianach zewnętrznych budynków. Barierę termiczną stanowi element ściany z zamontowanymi w przegrodzie przewodami z czynnikiem grzejnym o temperaturze niższej od temperatury w pomieszczeniu, lecz wyższej w miejscu przewodu od wynikającej z przenikania ciepła przez przegrodę bez bariery. W artykule, na podstawie przyjętego modelu przegrody z barierą termiczną, dla parametrów charakteryzujących przegrodę i jej otoczenie wyprowadzono wzór na sprawność przegrody. Sprawność bariery termicznej nie zależy od temperatur podstawy bariery a tylko od parametrów geometrycznych i termodynamicznych przegrody i otoczenia. Wykazano też, że sprawność bariery termicznej jest najwyższa, gdy oporność przegrody z obu stron bariery jest taka sama. Znajomość sprawności bariery umożliwi proste określenie średniej temperatury bariery i ilości ciepła oddawanego przez pomieszczenie oraz przez czynnik grzejny płynący w barierze. Należy pamiętać, że całkowita ilość ciepła oddana przez przegrodę z barierą termiczną jest większa niż przez przegrodę bez bariery, przy niskiej cenie energii oddawanej przez barierę koszty ogrzewania pomieszczenia mogą być niższe.
Słowa kluczowe: bariera termiczna, przepływ ciepła przez przegrodę z barierą termiczną, straty ciepła, sprawność bariery termicznej

Today, the problem of reducing primary energy consumption is increasingly discussed in the technical literature due to the depletion of fossil fuel resources and the adverse impact of their combustion on the environment. A large amount of energy is spent on heating buildings. In the case of much cheaper waste energy or energy from renewable sources with a temperature lower than required in the rooms, the so-called "thermal barrier" located in the external walls of buildings may be used in order to limit heat losses by transmission. The thermal barrier is an element of the wall with partitions with a heating medium installed in the partition, with a temperature lower than the temperature in the room, but higher in the place of the partition than resulting from heat transfer through the partition without a barrier. In the article, based on the adopted model of a partition with a thermal barrier, a formula for the efficiency of the partition was derived for the parameters characterizing the partition and its surroundings. The efficiency of the thermal barrier does not depend on the temperature of the barrier base, but only on the geometrical and thermodynamic parameters of the partition and the environment. It was also shown that the efficiency of the thermal barrier is the highest when the resistance of the partition on both sides of the barrier is the same. Knowing the efficiency of the barrier will allow you to easily determine the average temperature of the barrier and the amount of heat given off by the room and by the heating medium flowing in the barrier. It should be remembered that the total amount of heat given off through a partition with a thermal barrier is greater than through a partition without a barrier, with a low price of energy given off by the barrier, the costs of heating the room may be lower.
Keywords: thermal barrier, heat flow through a partition with a thermal barrier, heat loss, thermal barrier efficiency

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- ***e*** – grubość warstwy przegrody [m],
- ***l*** – połowa odległości pomiędzy przewodami przegrody [m],
- ***m*** – parametr [m^{-2}],
- ***q*** – parametr [$K \times m^{-2}$],
- ***Q̇*** – strumień ciepła [W],
- ***r*** – promień przewodu [m]
- ***R*** – opór cieplny [$m^2 \times K/W$],
- ***t*** – temperatura [°C],
- ***U*** – współczynnik przenikania ciepła [$W/(m^2K)$]
- ***x*** – współrzędna [m],
- η – sprawność [–],
- – różnica,
- ϑ – temperatura zredukowana [K],
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/(m×K)],

Indeksy

- ***b*** – bariera termiczna,
- ***e*** – zewnętrzna,
- ***i*** – wewnętrzna,

prof. dr hab. inż. Władysław Szaflik, https://orcid.org/0000-0003-3767-8766 – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Adres do korespondencji / Corresponding adress: Wladyslaw.Szaflik@zut.edu.pl

is – izolacji,
m – czynnik grzejny przepływający przez barierę,
p – podstawa elementu bariery
śr – średnia,
w – ściana z barierą termiczną,
α – przewodzenie ciepła,
0 – brak przepływu czynnika w barierze.

Wstęp

W literaturze technicznej coraz częściej poruszany jest problem ograniczenia zużycia energii pierwotnej. Stosunkowo duże ilości energii przeznaczane są do ogrzewania pomieszczeń. W przypadku zasobów znacznie tańszej energii odpadowej lub pochodzącej ze źródeł odnawialnych o temperaturze niższej niż wymagana w pomieszczeniach, można w celu ograniczenia strat ciepła przez przenikanie wykorzystać tzw. „barierę termiczną" umieszczoną w ścianach zewnętrznych. Barierę termiczną stanowi pionowy element ściany z zamontowanymi w przegrodzie przewodami z czynnikiem grzejnym o temperaturze niższej od temperatury w pomieszczeniu lecz wyższej niż wynikającej z przenikania ciepła przez przegrodę bez bariery.

W celu uproszczenia obliczeń wpływu parametrów geometrycznych i termodynamicznych bariery na jej temperaturę w artykule [13], Autor wprowadził pojęcie sprawności bariery termicznej η_b.

Została ona zdefiniowana jako stosunek różnicy średniej temperatury bariery termicznej $t_{śr\,b}$ i temperatury przegrody – $t_{b\,0}$ w miejscu umieszczenia bariery przy jej wyłączeniu, do różnicy temperatury podstawy bariery (zewnętrznej powierzchni przewodu) t_p i temperatury przegrody $t_{b\,0}$ w miejscu umieszczenia bariery przy jej wyłączeniu.

$$\eta_b = \frac{t_{śr\,b} - t_{b\,0}}{t_p - t_{b\,0}} \qquad (1)$$

W ostatnich latach ludzie coraz bardziej uświadamiają sobie niekorzystny wpływ spalania paliw na środowisko oraz ograniczoność zasobów kopalnych źródeł energii i ich wyczerpywanie. Stosunkowo duża ilość energii jest przeznaczana na ogrzewanie budynków, stąd nieprzypadkowo wzrasta zainteresowanie rozwiązaniami umożliwiającymi redukcję tego zużycia. Istotne staje się podnoszenie sprawności systemów i urządzeń stosowanych w ogrzewnictwie. Zastosowanie bardzo taniego lub odpadowego czynnika grzejnego o niskiej temperaturze zmniejsza zużycie wysokotemperaturowego ciepła na ogrzewanie, poprawia efektywność pozyskiwania energii ze spalania paliw i z niekonwencjonalnych źródeł energii.

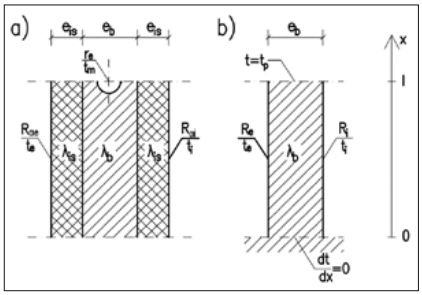
Model przegrody z barierą termiczną

Przegroda z barierą termiczną składa się z warstwy stanowiącej barierę pokrytą jednostronną lub dwustronnie izolacją termiczną [4]. Centralną warstwą przegrody jest bariera termiczna, wewnątrz niej umieszczone są przewody z tworzywa sztucznego, w których przepływa czynnik grzejny, jednocześnie bariera termiczna stanowi element nośny ściany [6, 7, 11]. Do bariery przymocowana jest warstwa izolacji.

Model wymiany ciepła wyprowadzono dla wydzielonego powtarzalnego elementu przegrody z barierą termiczną o szerokości wynoszącej połowę rozstawu przewodów i o długości 1 m. Od strony przewodu jest do niego dostarczane ciepło, przeciwległy koniec bariery jest płaszczyzną symetrii i ciepło przez nią nie przepływa. Przewodność cieplna materiału elementu nośnego stanowiącego barierę termiczną jest znacznie większa od przewodności cieplnej izolacji, w związku z tym przewodzenie wzdłużne w izolacji pominięto a opór przejmowania ciepła na zewnątrz bariery powiększono o opór cieplny izolacji [12]. Przejmowanie ciepła z jednej strony bariery i oddawanie z drugiej potraktowano jako wewnętrzne źródła ciepła elementu bariery. Pozostałe założenia przyjęto jak dla klasycznego żebra. Schemat przyjętego modelu przegrody z barierą termiczną pokazano na rysunku 1.

Równanie wyjściowe dla przyjętego modelu ma postać:

$$\frac{d^2t}{dx^2} = m \cdot t - q. \qquad (2)$$



Rys. 1.
Schemat modelu przegrody z barierą termiczną: a) przekrój przez wydzielony element przegrody, b) schemat modelu przegrody
Fig. 1. Diagram of the partition model with a thermal barrier: a) cross-section through a separate element of the partition, b) diagram of the partition model

gdzie:

$$m = \frac{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_e}}{\lambda_b \cdot e_b} \qquad (3)$$

i

$$q = \frac{\frac{t_i}{R_i} + \frac{t_e}{R_e}}{\lambda_b \cdot e_b} \qquad (4)$$

gdzie:

$$R_i = R_{i\alpha} + \frac{R_{ic}}{2} + R_{i\,is} \qquad (5)$$

i

$$R_e = R_{e\alpha} + \frac{R_{ec}}{2} + R_{e\,is} \qquad (6)$$

W przypadku gdy przez barierę nie przepływa czynnik, występują wyłącznie straty ciepła z pomieszczenia przez przenikanie, wtedy temperaturę w barierze $t_{b\,0}$ oblicza się ze wzoru (7):

$$t_{b\,0} = \frac{\frac{t_i}{R_i} + \frac{t_e}{R_e}}{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_e}} = \frac{q}{m} \qquad (7)$$

Równanie rozwiązano przy klasycznych warunkach brzegowych:

Dla $x = 0 \rightarrow \frac{dt}{dx} = 0$ (8)

Dla $x = l \rightarrow t = t_p$ (9)

Otrzymano rozwiązanie:

$$t(x) = \left(t_p - \frac{q}{m}\right) \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{m} \cdot x\right)}{\cosh\left(\sqrt{m} \cdot l\right)} + \frac{q}{m} \qquad (10)$$

Po wprowadzeniu temperatury zredukowanej:

$$\vartheta = t - t_{b0} = t - \frac{q}{m} \qquad (11)$$

Wzór na pole temperatury otrzymuje postać:

$$\vartheta(x) = \vartheta_p \cdot \frac{\cosh\left(\sqrt{m} \cdot x\right)}{\cosh\left(\sqrt{m} \cdot l\right)} \qquad (12)$$

Temperatura średnia elementu bariery wynosi:

$$\vartheta_{śr\,b} = \frac{\vartheta_p}{\sqrt{m} \cdot l} \cdot tgh\left(\sqrt{m} \cdot l\right) \qquad (13)$$

Strumień ciepła przekazywany do elementu bariery oblicza się ze wzoru:

$$\dot{Q}_b = \lambda_b \cdot e_b \cdot \sqrt{m} \cdot \vartheta_p \cdot tgh\left(\sqrt{m} \cdot l\right) \qquad (14)$$

Zależność tę, po uwzględnieniu równania (13) można przedstawić w postaci:

$$\dot{Q}_b = l \cdot \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_e} \right) \cdot \vartheta_{śr\,b} \qquad (15)$$

Otrzymane zależności na pole temperatury w barierze termicznej i strumień ciepła są identyczne jak przedstawione w literaturze dla żeber prostych [5]. Z tym, że bardziej ogólnie zdefiniowany jest parametr ***m.***

Charakterystyka sprawności bariery termicznej

Sprawność bariery termicznej

Wychodząc z definicj sprawności bariery termicznej, określonej zależnością (1) i wyprowadzonego wzoru (13) na temperaturę średnią elementu bariery obliczono sprawność bariery

$$\eta_b = \frac{t_{śr\,b} - t_{b0}}{t_p - t_{b0}} = \frac{\vartheta_{śr\,b}}{\vartheta_p} \qquad (16)$$

Po wykorzystaniu zależności (13) wzór na sprawność bariery termicznej ma postać:

$$\eta_b = \frac{tgh\left(\sqrt{m} \cdot l\right)}{\sqrt{m} \cdot l} \qquad (17)$$

Wzór na sprawność bariery termicznej jest identyczny jak dla żeber płaskich prostych. Należy pamiętać, że współczynnik ***m*** obliczamy ze wzoru (3) i jest on inaczej określony jak w przypadku żeber.

Znajomość sprawności pozwala w bardzo łatwy sposób określić średnią temperaturę elementu bariery termicznej:

$$\vartheta_{śr\,b} = \vartheta_p \cdot \eta_b = \vartheta_p \cdot \frac{tgh\left(\sqrt{m} \cdot l\right)}{\sqrt{m} \cdot l} \qquad (18)$$

i z podstawowych zależności obliczyć strumienie ciepła dopływające i odpływające od przegrody dla elementu o szerokości ***l*** i długości 1 m.

$$\dot{Q}_e = \frac{\left(t_{b0} + \vartheta_{śr\,b}\right) - t_e}{R_i} \qquad (19a)$$

$$\dot{Q}_i = \frac{t_i - \left(t_{b0} + \vartheta_{śr\,b}\right)}{R_e} \qquad (19b)$$

$$\dot{Q}_b = \dot{Q}_i - \dot{Q}_e \qquad (19c)$$

Jeżeli założymy, że:

$$b = \sqrt{m} \cdot l = \sqrt{\frac{\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_e}}{\lambda_b \cdot e_b}} \cdot l \qquad (20)$$

wtedy:

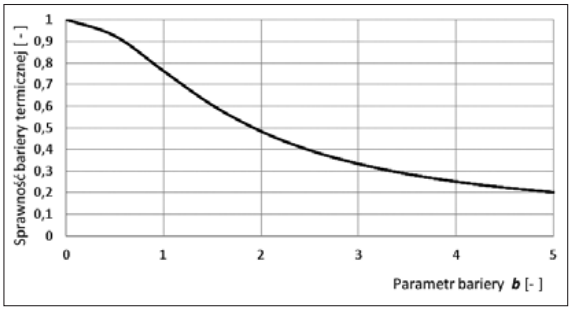
$$\eta_b = \frac{tgh\,(b)}{b} \qquad (21)$$

Temperaturę średnią bariery oblicza się ze wzoru:

$$\vartheta_{śr\,b} = \vartheta_p \cdot \eta_b \qquad (22)$$

Poniżej na rysunku 2 przedstawiono wykres sprawności określonej wzorem (21) w funkcji współczynnika ***b***.

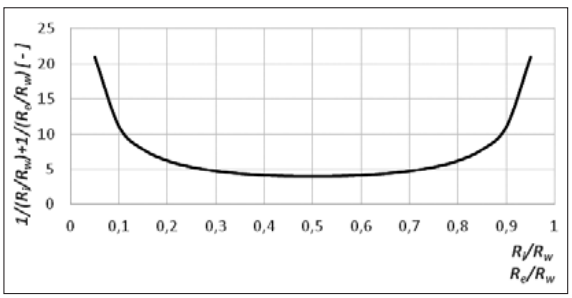
Rys. 2.
Sprawność bariery termicznej w zależności od wartości parametru *b*
Fig. 2. Thermal barrier efficiency depending on the value of the coefficient b



Wpływ grubości izolacji bariery termicznej na jej sprawność

Przy projektowaniu izolacji przegród budowlanych przyjmuje się, że powinny charakteryzować się one określonym oporem cieplnym. Dobiera się tak izolację, aby całkowity opór cieplny przegrody był większy od przyjętego. Dla ściany z barierą termiczną interesujące jest jaka powinna być grubość izolacji z jednej i drugiej strony bariery, żeby jej sprawność była jak największa. Sprawność bariery zależna od wartości współczynnika ***b*** wzrasta, ze wzrostem wartości tego współczynnika. Przy ustalonym przewodzeniu ciepła przez

Rys. 3.
Wartość funkcji U w zależności od stosunku oporności R_i/R_w i R_e/R_w
Fig. 3. The value of the U function depending on the resistance ratio R_i/R_w i R_e/R_w



ścianę dla oporów cieplnych zachodzi równanie:

$$R_w = R_i + R_e = const. \qquad (23)$$

$$R_e = R_w - R_i \qquad (24)$$

Gdzie R_i i R_e określone są równaniami (5) i (6).

We wzorze (20) służącym do określania współczynnika ***b*** występuje w liczniku pod pierwiastkiem wyrażenie z oporami R_i i R_e.:

$$U = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_e} \qquad (25)$$

Otrzymane, po podstawieniu do zależności (25) wzoru (24), równanie różniczkuje się. Ponieważ szukane jest ekstremum przyrównuje się je do zera:

$$\frac{dU}{d\,R_i} = \frac{d\left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_w - R_i}\right)}{d\,R_i} = 0 \qquad (26)$$

Druga pochodna różniczkowanego wyrażenia jest dodatnia otrzymujemy więc, że ekstremum to minimum występujące dla wartości połowy oporów ściany:

$$R_i = R_e = \frac{R_w}{2} \qquad (27)$$

Czyli dla wartości zredukowanej wynoszącej 0,5:

$$\frac{R_i}{R_w} = \frac{R_e}{R_w} = 0,5 \qquad (28)$$

Poniżej na rysunku 3 pokazano wykres zredukowanej funkcji $1/(R_i/R_w) + 1/(R_e/R_w)$.

Można zauważyć, że zgodnie z obliczeniami minimum występuje dla wartości zredukowanej 0,5. Czyli wartość minimalna występuje wtedy, kiedy opór cieplny z jednej strony bariery jest równy oporowi cieplnemu z drugiej strony bariery, dla takiego rozłożenia izolacji wartość sprawności bariery jest najwyższa.

Własności sprawności bariery termicznej

Podstawową własnością sprawności bariery termicznej jest to, że wzrost parametru ***b*** powoduje obniżanie jej sprawności. Analizując zależność na sprawność bariery termicznej można stwierdzić, że sprawność

bariery nie zależy od temperatury podstawy bariery i otoczenia ściany, a tylko od parametrów geometrycznych i termodynamicznych przegrody. Z analizy zależności na parametr ***b*** można stwierdzić, że:

1. Zwiększenie oporności izolacji na zewnątrz bariery powoduje podwyższanie sprawności bariery.
2. Zwiększanie odległości pomiędzy znajdującymi się w barierze przewodami z czynnikiem grzejnym skutkuje obniżeniem sprawności bariery.
3. Stosowanie materiału na barierę termiczną o wyższej wartości współczynnika przewodzenia ciepła podwyższa sprawność bariery termicznej.
4. Zwiększanie grubości bariery termicznej zwiększa jej sprawność.

Obliczanie sprawności bariery termicznej

Dla przyjętych parametrów geometrycznych i termodynamicznych bariery termicznej na początku zakłada się, że temperatura na powierzchni zewnętrznej przewodu t_p odpowiada temperaturze czynnika t_m i oblicza się parametr ***b*** ze wzoru (20). Następnie wyznacza się sprawność bariery η_b (z zależności (21) lub z wykresu (rys. 3)) i oblicza się temperaturę średnią bariery termicznej $\vartheta_{śr\ b}$ (równanie 22). Ze wzoru (15) oblicza się strumień ciepła przekazywany przez element bariery. Następnie uwzględniając parametry geometryczne i termiczne przewodu oblicza się współczynnik przejmowania ciepła α_m i opór cieplny ścianki przewodu R_p, oraz ze wzoru (29) określa spadek temperatury pomiędzy czynnikiem i podstawą bariery:

$$\Delta t = t_m - t_p = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot r \cdot \left(\alpha_m \frac{1}{R_p} \right)} \qquad (29)$$

Wartość współczynnika przejmowania ciepła od czynnika grzejnego płynącego w barierze można obliczyć ze wzoru Gnielińskiego [3].

W celu określenia temperatury na zewnątrz przewodu koryguje się o wartość ***t*** przyjętą na powierzchni zewnętrznej przewodu temperaturę ϑ_p i następnie wykorzystując wyliczoną sprawność bariery η_b oblicza się ze wzoru (16) średnią temperaturę bariery termicznej. Otrzymana wartość z wystarczającą dokładnością estymuje średnią temperaturę bariery $\vartheta_{śr\ b}$. Znając budowę i wymiary ściany z barierą ze wzoru (7) wyznacza się średnią temperaturę przegrody $t_{b\ 0}$ w miejscu bariery. Następnie ze wzorów (17a), (17b) i (17c) oblicza się strumienie ciepła płynące w elemencie przegrody.

Podsumowanie i wnioski

W artykule, na podstawie opracowanego modelu przegrody z barierą termiczną, dla przyjętych wielkości wejściowych i otoczenia przegrody określono sprawność bariery termicznej. Zdefiniowano ją jako stosunek różnicy średniej temperatury bariery termicznej i temperatury przegrody w miejscu umieszczenia bariery przy jej wyłączeniu, do różnicy temperatury podstawy bariery (zewnętrznej powierzchni przewodu z czynnikiem) i temperatury przegrody w miejscu umieszczenia bariery przy jej wyłączeniu. Dla przyjętych danych obliczono sprawność bariery w zależności od połowy odległości miedzy przewodami bariery termicznej i od iloczynu współczynnika przewodzenia ciepła oraz grubości bariery termicznej. Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresach. Otrzymane wnioski dotyczące wpływu tych parametrów na sprawność bariery potwierdziły oczekiwania, że wraz ze wzrostem odległości między przewodami sprawność bariery maleje, a ze wzrostem przewodności materiału bariery rośnie. Wykazano również, że sprawność bariery termicznej jest najwyższa, gdy opór cieplny przegrody z obu stron bariery jest taki sam. Znajomość sprawności bariery umożliwia proste określenie średniej temperatury bariery i ilości ciepła oddawanego przez pomieszczenie i przez czynnik grzejny płynący w barierze.

BIBLIOGRAFIA

[1] Barkanyi T.: Patent Nr: P398122, Element of building construction for active insulation of buildings, 2012.

[2] Barkanyi T., Nagylucskay L.: Building structure with active heat. EP2231952A1 European Patent Office, 11.06.2009.

[3] Incropera F. P., DeWitt D. P., Bergman T. L., Lavine A. S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. John Wiley & Sons, 2007.

[4] Kisilewicz T., Fedorczak-Cisak M., a, Barkanyi T.: Active thermal insulation as an element limiting heat loss through external walls. Energy and Buildings Volume 205, 15 December 2019, 109541,

[5] Kern D. Q., Kraus A. D.: Extended surfage heat transfer. McGraw Hill Book Company. New York 1972,

[6] Krzaczek M.: Koncepcja Bariery Termicznej w budynkach o bardzo niskim zapotrzebowaniu na energię," Inżynieria Morska i Geotechnika, vol. 2, pp. 154-162, 2010.

[7] Krzaczek M., Kowalczuk Z.: Thermal Barrier as a technique of indirect heating and cooling for residential buildings," (in English), Energy and Buildings, Article vol. 43, no. 4, pp. 823-837, Apr 2011, DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.12.002.

[8] Leciej-Pirczewska D., Szaflik W.: Wykorzystanie niskotemperaturowego czynnika w ogrzewaniu ściennym. Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, vol. 41, no. 5, pp. 168-172, 2010.

[9] Leciej-Pirczewska D., W. Szaflik: Wykorzystanie niskotemperaturowego czynnika w ogrzewaniu ściennym. Część II, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, vol. 41, no. 12, pp. 455-459, 2010.

[10] Leciej-Pirczewska D., Szaflik W.: Wpływ temperatury bariery termicznej w ścianie budynku na straty ciepła. X Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje, 2006.

[11] Małek M.: Wpływ parametrów przegrody aktywowanej termicznie na komfort cieplny i zużycie energii. Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki. Rozprawa doktorska. Promotor: prof. dr hab. inż. Halina Koczyk. Poznań, 2022.

[12] Szaflik W.: Analiza wymiany ciepła w żebrach dwuwarstwowych. Wydział Budowy Maszyn i Okrętów. Rozprawa Doktorska. Promotor: prof. dr hab. inż. Władysław Nowak. Szczecin,1982.

[13] Szaflik W.: Sprawność bariery termicznej. Instal nr 6, 2023, str. 15–18, DOI 10.36119/15.2023.6.2.

■